Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 38, No. 4, Sep.-Oct. 2024, p. 525-540

Evaluating Aquifer's Hydrodynamic Parameters Using Pumping Tests and Geoelectric Data (Case Study: Alluvial Aquifer in the Northeast of Gachsaran City)

A. Khedri[1], A. Saberinasr[*2], N. Kalantari[3]

1- Director of Kusar Dam, Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Regional Water Authority, Yasuj, Iran
2 and 3- Assistant Professor and Full Professor in Hydrogeology, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran Univercity of Ahvaz, Ahvaz, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: a.saberinasr@scu.ac.ir)

Received: 21-02-2024 Revised: 08-07-2024 Accepted: 20-07-2024 Available Online: 20-07-2024	**How to cite this article:** Khedri, A., Saberinasr, A., & Kalantari, N. (2024). Evaluating aquifer's hydrodynamic parameters using pumping tests and geoelectric data (Case study: alluvial aquifer in the Northeast of Gachsaran City). *Journal of Water and Soil, 38*(4), 525-540. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86955.1389

Introduction

The comprehension of the hydrogeological conditions of the aquifer and the determination of its hydraulic characteristics, such as hydraulic conductivity, transmissivity coefficient, and specific storage, are crucial for the management and preservation of groundwater resources. Various conventional methods, including empirical formulas, laboratory techniques (constant and falling head), tracer tests, field tests (Lugeon, Lefranc, slug, flowmeter, and pumping tests), and groundwater inverse modeling, are employed to establish these characteristics, particularly hydraulic conductivity. Empirical formulas are limited to ideal conditions, and in laboratory methods, the sample must be kept undisturbed. Due to the impracticality of measuring large-scale effective factors, the hydraulic conductivity determined through laboratory methods is also the only representative of the hydraulic conductivity at the sampling point. Tracer studies encounter numerous constraints, such as time, cost, porosity determination, and tracer dispersion in multilayered aquifers. It is also difficult to determine the average hydrodynamic properties of the heterogeneous aquifer based on the data obtained from a specific section of the Lefranc and Slug tests. Consequently, pumping tests are commonly selected for hydraulic parameter estimation. Although costly and time-intensive, these tests provide more precise coefficients. Geophysical methods have been greatly developed during the last two decades and have shown a significant correlation with the hydraulic parameters of the aquifer derived from borehole pumping tests or direct laboratory measurements. This approach minimizes uncertainties in numerical model calibration, improves data coverage, and reduces the time and cost of regional hydrogeological investigations. The conventional approach, known as the electrical resistivity method, is still widely used in global and local research projects for evaluating aquifer hydraulic characteristics (Ige *et al.*, 2018; Arétouyap *et al.*, 2019; Youssef, 2020; Ullah *et al.*, 2020; de Almeida *et al.*, 2021; Lekone *et al.*, 2023). Therefore, this study aims to use the integrated approach of the geophysical method and pumping test as a cost-effective and efficient alternative for estimating the hydraulic parameters of the alluvial aquifer in the northeast of Gachsaran city.

Material and Methods

The research area is an alluvial aquifer located 5 km to the northeast of Gachsaran, between coordinates 50-52 to 51-09 E longitude and 30-15 to 30-28 N latitude. Using 86 vertical electrical soundings, Archie's equations, and the IPI2win software, the hydraulic characteristics of the aquifer under investigation were estimated. Subsequently, these characteristics were then compared to the coefficients derived from the data of two pumping

https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86955.1389

test wells, which were calculated using the Aquifer test software and obtained via the Cooper-Jacob and Neuman methods.

Results and discussion

The hydrodynamic coefficients of the aquifer were initially determined using the Cooper-Jacob method in this study. The hydraulic conductivity values for wells one and two are 4.9 m/day and 5.7 m/day, respectively. Correspondingly, the storage coefficient values for wells one and two are 0.015 and 0.021, respectively. Based on the Cooper-Jacob approach, it is deduced that if the storage coefficient values exceed 0.001, the aquifer is classified as unconfined. In this study, the storage coefficient values for both pumping wells suggest that the aquifer is unconfined. Since the vertical flow component and the delayed yield phenomenon should also be taken into account in unconfiend aquifers, the Neuman analytical model has been used in the studied aquifer. The values of specific yield (Sy) for pumping wells one and two, which are related to delayed yield, are 0.05 and 0.04, respectively. These values were calculated by analyzing the first segment of the curve derived from the Neuman logarithmic drawdown-time plot. The storage coefficient values for pumping wells one and two, extracted from the second section of the curve, are 0.015 and 0.021, respectively. Furthermore, the transmissivity value for well number 1 was 323 m^2/day, while for well number 2, it was 655.5 m^2/day. The vertical electrical sounding (VES) data were subsequently initially analyzed and interpreted using the IPI2win software and the equalization curve method (partial curve matching technique). The coefficients denoted as m and n, indicative of the degree of cementation of the sediments, were determined based on the sedimentary composition prevalent in the area. Archie's equations were employed to calculate the formation factor and porosity parameters. The aquifer exhibits a porosity range of approximately 0.15 in the eastern and southeastern parts (near the outlet of the plain) and around 0.41 in the centeral, northern, and northwestern sections of the area (next to the Asmari Formation). The specific yield (Sy) of the aquifer was calculated using the provided formula:

$$S_y = \left(\frac{\rho_w}{\rho_{sat}}\right)^{\frac{1}{m}} \left[1 - \left(\frac{\rho_{sat}}{\rho_{unsat}}\right)^{\frac{1}{n}}\right]$$

The minimum and maximum specific yield were estimated as 0.006 (in the eastern and southeastern regions) and 0.089 (in the western and northwestern regions of the plain), respectively, with an average value of 0.04. The transmissivity coefficients for the entire aquifer were then calculated based on the fitted relationship between hydraulic conductivity (K) and formation factor (F):

$$T = Kb = (K = -0.1x^2 + 2.05x - 4.5) \times b$$

The range of transmissivity coefficients varies from a minimum of 63 m^2/day (in the western and northwestern sections of the plain) to a maximum of 608.9 m^2/day (in the eastern and southeastern areas). The average transmissivity coefficient is calculated as 323.7 m^2/day. To ensure the precision of the geoelectric method's coefficients, a comparative analysis was conducted with the hydrodynamic coefficients obtained from the two pumping test wells, as presented in the table below:

Well No.	K(m/d)		T(m^2/d)		Sy	
	PT*	VES*	PT	VES	PT	VES
1	4.9	3.6	323	237	0.05	0.05
2	5.7	5.5	655.5	632.5	0.04	0.03

*PT: Pumping Test; VES: Vertical Electrical Sounding

Conclusion

The evaluation and comparison of the hydrodynamic coefficients derived from the aforementioned methods indicate that the geoelectric method coefficients exhibit acceptable agreement with the pumping test coefficients. In other words, the analysis of the pumping test conducted using the Neuman technique in the unconfined aquifer revealed that well number two displayed a greater transmissivity coefficient, while well number one presented a higher specific yield. These findings are confirmed by the geoelectric approach. Consequently, such hybrid approaches, which include simultaneous analysis of geophysical methods (such as VES) and pumping tests will be a great alternative to multiple costly pumping tests for evaluating the hydrodynamic coefficients of an aquifer. Moreover, employing this hybrid technique enables the generation of dense hydrodynamic coefficients in an aquifer for use as inputs in the groundwater model.

Keywords: Gachsaran, Hydrodynamic coefficients, Pumping Test, Vertical Electrical Soundings

نشریه آب و خاک
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۳۸، شماره ۴، مهر-آبان ۱۴۰۳، ص. ۵۲۵-۵۴۰

ارزیابی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان با استفاده از اطلاعات آزمون پمپاژ و ژئوالکتریک (مطالعه موردی: آبخوان آبرفتی شمال‌شرق گچساران)

اکبر خدری[1]- امیر صابری نصر[2*]- نصرالله کلانتری[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۰۲
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰

چکیده

پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان اهمیت ویژه‌ای در تمام بررسی‌های هیدروژئولوژیکی دارد و یکی از معضلات مهم در محاسبات هیدروژئولوژیکی و مدیریت آبخوان‌ها عدم دسترسی به داده‌های قابل اطمینان می‌باشد. روش‌های مختلفی برای تخمین و تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان‌ها وجود دارد که دقیق‌ترین آن‌ها استفاده از داده‌های آزمون پمپاژ است، علاوه بر آن، داده‌های ژئوالکتریکی نیز حائز اهمیت می‌باشد. در این تحقیق از اطلاعات آزمون پمپاژ دو چاه اکتشافی و ۸۶ سونداژ قائم ژئوالکتریکی به روش مقاومت ویژه جهت ارزیابی پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان آبرفتی شمال شرق شهر گچساران استفاده شده است. پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان همچون هدایت هیدرولیکی، ضریب قابلیت انتقال و آبدهی ویژه با استفاده از داده‌های آزمون پمپاژ دو چاه اکتشافی به روش کوپر-ژاکوب و نیومن تعیین شد، سپس همین پارامترهای هیدرودینامیکی با استفاده از داده‌های ژئوالکتریکی (سونداژ الکتریکی قائم) نیز محاسبه و با داده‌های آزمایش پمپاژ مقایسه شدند. پس از بررسی پارامترهای به‌دست‌آمده از آزمون پمپاژ چاه‌های شماره یک و دو به روش نیومن در آبخوان آزاد معلوم گردید که ضریب قابلیت انتقال برای چاه شماره دو (۶۶۵/۵ متر مربع بر روز) که در قسمت شرقی آبخوان قرار دارد مقدار بیشتری است و با روش ژئوالکتریک (۶۳۲/۵ متر مربع بر روز) همخوانی دارد، همچنین مقدار آبدهی ویژه در روش آزمون پمپاژ چاه شماره یک (۰/۰۵) مقدار بیشتری است که باز هم روش ژئوالکتریک (۰/۰۵) آن را تأیید می‌کند. تمامی نتایج نشان‌دهنده تخمین مطلوب پارامترهای هیدرودینامیکی توسط روش ژئوالکتریکی است و روش آزمون پمپاژ نیز بر آن صحه می‌گذارد؛ لذا از روش ژئوالکتریکی می‌توان در تصمیم‌گیری و برنامه‌ریزی‌های حفاری‌های آینده در منطقه استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: آزمون پمپاژ، پارامترهای هیدرودینامیک، سونداژ قائم ژئوالکتریکی، گچساران

مقدمه

به‌دلیل افزایش روزافزون جمعیت و متعاقب آن فعالیت های کشاورزی، نیاز به استفاده از منابع آب زیرزمینی در سراسر جهان گسترش یافته است (Song *et al*., 2011). این مسئله لزوم توجه به این منابع و مدیریت بهینه آن‌ها را به‌ویژه در مناطق خشکی، مانند ایران، به‌عنوان اصلی‌ترین منابع تأمین پایدار آب، دوچندان می‌کند. به‌طور کلی، برای مدیریت و حفاظت از منابع آب زیرزمینی شناخت شرایط هیدروژئولوژیکی آبخوان و تعیین پارامترهای هیدرولیکی آن، مانند هدایت هیدرولیکی، ضریب قابلیت انتقال و ذخیره ویژه، بسیار مهم است. مدل‌سازی و نحوه انتقال آلاینده‌ها نیز به خصوصیات هیدرولیکی آبخوان وابسته است؛ به‌طوری‌که ممکن است تغییرات جزئی در خواص هیدرولیکی، رفتار های انتقال مواد را به مقدار قابل‌توجهی تغییر دهد. تعیین این خصوصیات (به‌ویژه K) به‌وسیله تجزیه و تحلیل روش های مرسوم مختلفی، از جمله فرمول های تجربی (Lashkaripour *et al*., 2013)، روش‌های آزمایشگاهی (بار

۱- مدیر سد کوثر، شرکت آب منطقه‌ای کهگیلویه و بویراحمد، یاسوج، ایران
۲ و ۳- به‌ترتیب استادیار و استاد هیدروژئولوژی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: a.saberinasr@scu.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jsw.2024.86955.1389

ثابت و افتان) (Hatami Golmakani *et al.*, 2017)، آزمایش‌های ردیابی (Yeh *et al.*, 2000; Crestani *et al.*, 2015; Vu & Jardani, 2022)، آزمایش های صحرایی (آزمایش لوژان، لوفران، آزمایش اسلاگ، آزمایش‌های فلومتر و آزمون پمپاژ) (Calvache *et al.*, 2016; Hasan *et al.*, 2019; Falowo *et al.*, 2019) و مدل‌سازی معکوس آب زیرزمینی (Vogeler *et al.*, 2019; Minutti *et al.*, 2020) صورت می‌گیرد. فرمول های تجربی تنها برای شرایط ایده‌آل، مثلاً اندازه یکسان ذرات محیط متخلخل ارائه شده‌اند و نسبت به سایر روش‌ها دقت پایین‌تری دارند. در روش‌های آزمایشگاهی نیز حفظ دست‌نخوردگی نمونه ضروری است. ضمن آن‌که هدایت هیدرولیکی تعیین شده با روش‌های آزمایشگاهی تنها معرف هدایت هیدرولیکی در نقطه نمونه‌برداری شده است. علاوه بر این، بسیاری از عوامل بزرگ‌مقیاس مؤثر در ضرایب هیدرودینامیکی آبخوان، در نمونه‌های آزمایشگاهی قابل برداشت و اندازه‌گیری نیست. مطالعات ردیابی نیز با محدودیت های فراوانی نظیر، زمان و هزینه مواجه است. علاوه بر این، در آبخوان‌های چندلایه، حرکت ردیاب در لایه با هدایت هیدرولیکی بالاتر ممکن است موجب خطا در اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی معادل گردد. در این روش به پارامتر تخلخل نیز نیاز است که اندازه‌گیری آن نیز خود یک مشکل بزرگ‌تر به‌حساب می‌آید. در آزمایش‌های لوفران و اسلاگ نیز تعیین میانگین خواص هیدرودینامیکی سفره آبدار ناهمگن بر اساس داده های به‌دست‌آمده از یک مقطع خاص مشکل است؛ بنابراین پارامترهای هیدرولیکی مذکور، به‌ویژه هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال، معمولاً از طریق آزمون پمپاژ انجام شده بر روی گمانه‌های حفاری شده تخمین زده می‌شوند. اندازه‌گیری مستقیم ویژگی‌های هیدرولیکی به این روش نیز اگرچه از دقت قابل‌قبول‌تری برخوردار است، ولی در واقعیت چنین آزمایش‌هایی پرهزینه و زمان‌بر هستند و تنها می‌توانند اطلاعات مکانی محدودی را ارائه دهند. ضمن آنکه، آنالیز تحلیلی اولیه ویژگی‌های هیدرولیکی آبخوان در پاسخ به پمپاژ/تزریق اغلب با فرض همگنی محیط انجام می‌گردد. این موضوع ممکن است برای استنباط ویژگی‌های ظاهری آبخوان کافی باشد؛ اما نمی‌تواند رفتار غیرماندگار آبخوان مورد آزمایش قرار گرفته را نشان دهد.

روش‌های ژئوفیزیکی در طول دو دهه گذشته توسعه زیادی یافته‌اند. در پژوهش‌هایی که در این مدت انجام شده است، ویژگی های الکتریکی آبخوان که از روش‌های ژئوفیزیکی به‌دست می‌آید، همبستگی قابل‌ملاحظه‌ای را با پارامترهای هیدرولیکی آبخوان حاصل از آزمایش های پمپاژ در گمانه ها یا از اندازه‌گیری های مستقیم آزمایشگاهی نشان داده است. این نتایج و مشاهدات، فضای تحقیقاتی را برای تخمین مستقیم پارامترهای آبخوان از داده‌های ژئوفیزیکی، نظیر مقاومت ویژه الکتریکی باز کرد؛ زیرا هر دو ویژگی الکتریکی و هیدرولیکی اطلاعات ارزشمندی را در مورد هندسه فضای منافذ و ناهمگنی آبخوان می‌دهند. بنابراین، از همبستگی پارامتر های هیدرولیکی به‌دست‌آمده با استفاده از هر دو روش آزمون پمپاژ و همچنین تحلیل داده‌های مقاومت ویژه سطحی می‌توان داده‌های قابل اعتمادتری را از ویژگی‌های هیدرولیکی آبخوان به‌دست آورد. علاوه بر این، با این رویکرد، می‌توان عدم قطعیت‌ها را در کالیبراسیون مدل عددی کاهش داد، پوشش داده‌ها را بهبود بخشید و زمان و هزینه تحقیقات هیدروژئولوژیکی را در مقیاس منطقه‌ای کاهش داد. به همین دلیل، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی به‌عنوان یک تکنیک مکمل مؤثر، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که نیاز به بهینه‌سازی منابع ضروری است، مطرح می‌شود.

اگرچه سایر روش‌های ژئوفیزیکی کلاسیک نظیر پتانسیل‌خودزا، روش انکساری لرزه‌ای، رادار های نفوذی به زمین[1]، تکنیک های الکترومغناطیسی حوزه زمان و فرکانس، پلاریزاسیون القایی و غیره در کمی سازی پارامترهای آبخوان و نقشه‌برداری زیر سطحی گسترش و پیشرفت قابل‌توجهی داشته است؛ با این وجود، استفاده وسیع از رویکرد مرسوم، یعنی روش مقاومت ویژه الکتریکی، در تخمین پارامتر های هیدرولیکی سفره های آب زیرزمینی در بسیاری از پژوهش ها در سطوح بین‌المللی و محلی ادامه دارد (Ige *et al.*, 2018; Arétouyap *et al.*, 2019; Youssef, 2020; Ullah *et al.*, 2020; de Almeida *et al.*, 2021; Lekone *et al.*, 2023). برای مثال پردمو و همکاران (Perdomo *et al.*, 2014) روشی برای استخراج پارامترهای هیدرولیکی با ترکیب داده‌های هیدروژئولوژی کلاسیک با اندازه‌گیری‌های ژئوفیزیکی پیشنهاد دادند. آن‌ها نتایج مطالعه خود را با نتایج قبلی از سایر نویسندگان مقایسه کردند که همخوانی بالایی را آن ها نشان می‌داد. کازاکیس و همکاران (Kazakis *et al.*, 2016) از روش‌های ژئوالکتریکی و مقایسه آن با نتایج آزمون پمپاژ، برای تخمین تخلخل، هدایت هیدرولیکی و قابلیت انتقال در یک آبخوان متخلخل استفاده کردند. بدین منظور، مقاومت الکتریکی آبخوان و همچنین هدایت الکتریکی آب زیرزمینی در ۳۷ سایت و چاه اندازه‌گیری شد. ضرایب با استفاده از قانون آرچی[2] محاسبه و همبستگی بالایی را با نتایج آزمون پمپاژ نشان داد. علاوه بر این، یک رابطه بین مقاومت الکتریکی و هدایت هیدرولیکی برای آبخوان مورد مطالعه ایجاد شد تا امکان برآورد این پارامتر ها در سایت‌های فاقد داده فراهم شود. عبدالرزاق و همکاران (Abdulrazzaq *et al.*, 2020) از تکنیک‌های سونداژ الکتریکی قائم[3] و تصویربرداری مقاومت الکتریکی دوبعدی[4] برای برآورد پارامترهای

1- Ground-penetrating radar (GPR)
2- Archie's law
3- Vertical electrical sounding (VES)
4- Electrical resistivity imaging (ERI)

هیدرولیکی آبخوان در منطقه مزارع فدق[1] در فروافتادگی بحرالنجف، عراق اســـتفاده کردند. آن‌ها پس از برآورد پارامترهای هیدرولیکی با روش‌های مذکور، درنهایت نقاط جدیدی برای حفاری چاه‌های جدید توصـیه نمودند. حسـن و همکاران (Hasan *et al.*, 2021) از روش ســونداژ الکتریکی قائم و مقایســه آن با روش آزمون پمپاژ در منطقه هویژو چین برای تعیین پارامتر های هـ یدرولیکی آبخوان موجود در ســنگ هوازده اســتفاده کردند. روابط تجربی بین هدایت هیدرولیکی محاسبه شده از آزمون پمپاژ (Kw) و مقاومت آبخوان (ρa)، و دیگری بین ضـــریب قابلیت انتقال حاصـــل از آزمون پمپاژ (Tw) و مقاومت عرضی (Tr) به دست آوردند و از آن برای تخمین K و T برای همه نقاط سونداژ الکتریکی قائم که در آن‌ها آزمون پمپاژ انجام نشده بود، اســتفاده نمودند. از تحقیقات داخلی نیز می‌توان به مطالعه طاهری تیزرو و همکاران (Taheri-tizro *et al.*, 2012) اشاره نمود. ایشان به مقایسه مشخصه‌های هیدرولیکی سفره‌های آب زیرزمینی برآورد شده با دو روش آزمون پمپاژ (افت پله‌ای) و سونداژ الکتریکی (۲۹ سونداژ) پرداختند. نتایج آزمون t-test در آن مطالعه نشـــان داد که ضـــریب قابلیت انتقال در دو روش ژئوالکتریک و افت پله‌ای، تفاوت معنی‌داری نداشته است. همچنین بین مقاومت عرضی اصلاح شده و ضریب قابلیت انتقال (T) لایه‌های آبدار یک رابطه همبســتگی به دســت آمد که حاکی از صحت آزمایش‌ها در محدوده مطالعاتی مذکور و همچنین مؤید مطالعات قبلی ســینگال و نواس می‌باشــد. قابلیت انتقال، فاکتور سازند و آبدهی ویژه با استفاده از روابط تجربی و نیمه تجربی تخمین زده شدند (Schimschal, 1981; Urish, 1981; Huntley, 1986; Frohlich & Kelly, 1988; Chen *et al.*, 2001; George *et al.*, 2015). روش ژئوفیزیکی توانســته اسـت با صـرفه‌جویی در هزینه‌ها، زمان و قابلیت اســتفاده در لیتولوژی‌های متنوع کمک قابل‌توجهی در تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان در کنار روش آزمون پمپاژ داشته باشد و به‌عنوان روشی مکمل مورد استفاده قرار گیرد.

بنابراین هدف این مطالعه اســتفاده از رویکرد یکپارچه روش ژئوفیزیکی و آزمـایشـــات پمپـاژ، بـه‌عنوان یـک روش مکمـل مقرون‌به‌صــرفه و کارآمد برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان آبرفتی شمال شرق گچساران است. ازآنجایی‌که در ایران، هزینه بالای حفاری گمانه‌ها، تنها منجر به حفاری چند چاه آزمایشــی پمپاژ در یک دشت شده و گاهی اوقات فقط یک چاه مشاهده‌ای در هر آزمون پمپاژ حفر می‌شود؛ بنابراین، این موضوع منجر به کسب اطلاعات محدودی در زمینه توزیع پارامترهای هیدرولیکی در هر ســیســتم آبخوان شــده اســت. علاوه بر این، آزمایش پمپاژ انجام شـده با اسـتفاده از یک چاه پمپاژ و یک چاه مشـــاهده‌ای، ناهمســـانی و توزیع مکانی پارامترهای هیدرولیکی چاه پمپاژ را در نظر نمی‌گیرد. بنابراین، در این تحقیق با اســتفاده از ۸۶ ســونداژ الکتریکی قائم و معادلات آرچی[2]، پارامترهای هیدرودینامیک آبخوان مورد مطالعه تخمین زده شد و با نتایج داده‌های آزمایش پمپاژ مقایسه انجام گردید.

مواد و روش‌ها

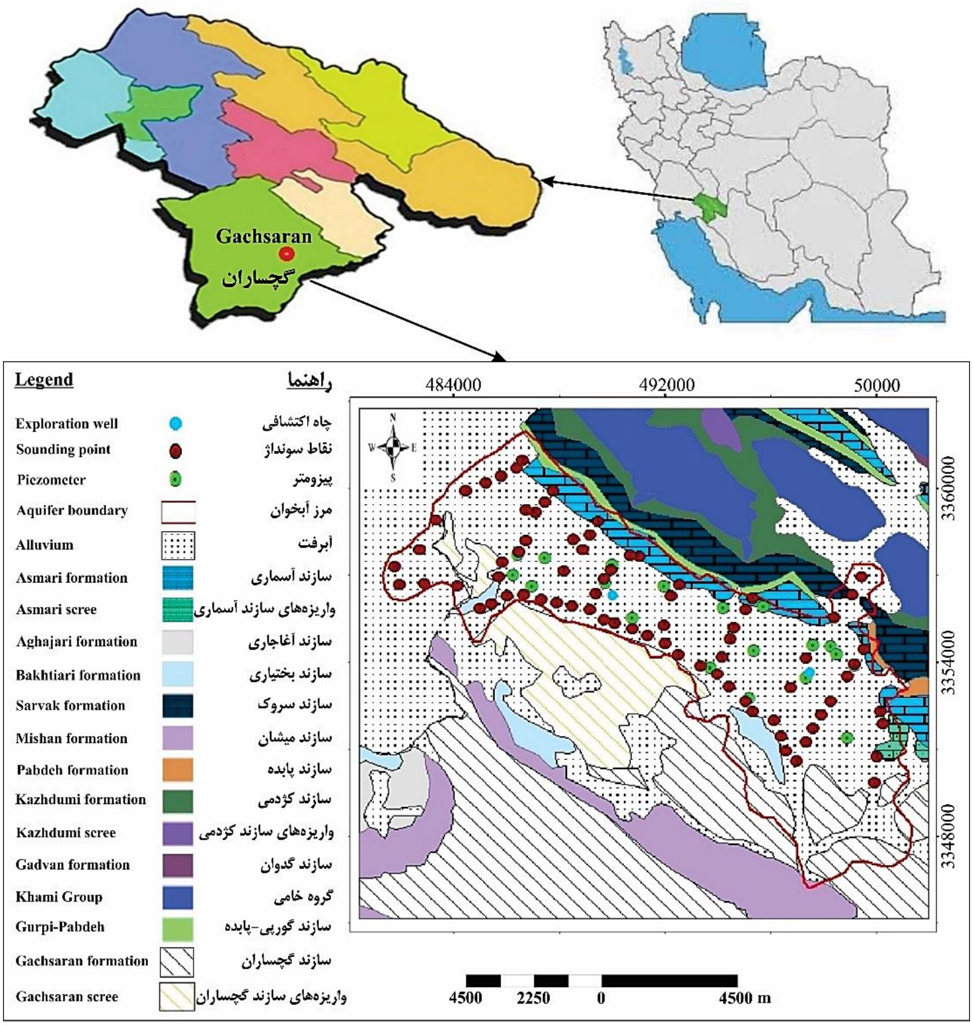
منطقه مورد مطالعه

محدوده مطالعاتی (شـــکل ۱)، در جنوب اســـتان کهگیلویه و بویراحمد در ۵ کیلومتری شمال شرق شهر گچساران بین مختصات ۵۲-۵۰ الی ۰۹-۵۱ طول شرقی و ۱۵-۳۰ الی ۲۸-۳۰ عرض شمالی و ارتفاع متوسـط ۷۰۰ متر از سـطح دریا واقع گردیده که از شـمال به ارتفاعات کوه خامی، از جنوب به مسیل فصلی خربل (خروجی دشت) منتهی به رودخانه زهره، از شرق به دشت کوچک سربیشه و بیدزرد و از غرب به محدوده مطالعاتی دوگنبدان و شـــهر گچســـاران محدود می‌شـود. از لحاظ چینه‌شـناسـی حوضـه آبریز محدوده مورد مطالعه از نهشته‌های کرتاسه تا کواترنری تشکیل شده‌اند که از قدیم به جدید شـــامل گروه خامی (فهلیان، گدون، داریان)، کژدمی، ایلام-ســروک، پابده-گورپی، آســماری، گچســاران، میشــان، بختیاری و آبرفت‌ها و رسـوبات عهد حاضـر می‌باشـد (Darvishzadeh, 2003). بر اسـاس طبقه‌بندی دومارتن، آبخوان شمال شرق شهر گچساران دارای اقلیم نیمه‌خشـــک و بر اســـاس طبقه‌بندی آمبرژه دارای اقلیم نیمه‌خشـــک معتدل می‌باشد.

آبخوان مورد مطالعه دارای امتدادی شـــمال‌غربی- جنوب‌شـــرقی اســـت. با توجه به اطلاعات حاصـــل از پیزومترها جهت جریان آب زیرزمینی نیز در همین راستا است و نوع آبخوان از نوع آزاد می‌باشد. بخش عمده این آبخوان ناشـــی از فرســـایش آهک‌ها و ســـازندهای کربناتی بالادست بوده که مواد سازنده آن در ابتدای محدوده (بخش ورودی) و امتداد مخروط‌افکنه‌ها اغلب، درشـــت و از نوع قلوه‌ســـنگ، گراول، ماسه و گاهاً رس و در نواحی میانی سفره با دانه‌بندی متوسط و در بخش خروجی آبخوان به‌طور معمول ریزدانه و از جنس سـیلت و رس می‌باشد. بر اساس مطالعات ژئوفیزیک صورت گرفته (اطلاعات ۸۶ سـونداژ الکتریکی قائم) متوسـط ضـخامت سـفره، حدود ۱۳۵ متر اســـت. جنس ســـنگ کف این آبخوان، در اغلب بخش‌ها، ســـازند گچســـاران و در برخی نواحی دشـــت، آهک‌های نابرجای ســـازندهای آســماری و کنگلومرای بختیاری برآورد شــده اســت. در شــکل ۱ با استفاده از نقشه زمین‌شناسی پایه ورقه گچساران با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ نقشه زمین شناسی حوضه و دشت مورد مطالعه تهیه شده و موقعیت پیزومترها، نقاط ســـونداژ الکتریکی و دو چاهی که بر روی آن‌ها آزمایش پمپاژ انجام شده نمایش داده شده است.

1- Fadaq

2- Archie equations



شکل ۱- موقعیت نقاط آزمون پمپاژ (چاه‌های اکتشافی)، محل سونداژهای الکتریکی قائم (VES) و پیزومترها در منطقه مورد مطالعه بر روی نقشه زمین‌شناسی

Figure 1- The location of pumping test points (exploration wells), vertical electrical sounding, and piezometers in the study area on a geological map

مدل‌ها و روش‌های تحلیلی آزمون پمپاژ در آبخوان محبوس

با مشابه قرار دادن معادله جریان آب‌های زیرزمینی و جریان گرما، جریان شعاعی آب‌های زیرزمینی طبق معادله (۱) در مختصات قطبی به شکل معادله‌های (۲ و ۳) حل می‌شود (Theis, 1932).

$$\frac{\delta^2 h}{\delta r^2}+\frac{1}{r}\frac{\delta h}{\delta r}=\frac{S}{T}\frac{\delta h}{\delta t} \qquad (۱)$$

$$s=\frac{Q}{4\pi T}\int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u}du=\frac{Q}{4\pi T}W(u) \qquad (۲)$$

$$u=\frac{r^2 S}{4Tt} \qquad (۳)$$

در این معادلات، t زمان از شروع پمپاژ (ثانیه)، r فاصله چاه مشاهده‌ای از مرکز چاه پمپاژ (متر)، s افت سطح آب در چاه مشاهده‌ای (متر)، Q دبی پمپاژ (متر مکعب بر ثانیه)، u و W(u) تابع چاه، S ضریب ذخیره و T ضریب قابلیت انتقال آبخوان است.

پس از به‌دست آوردن منحنی افت-زمان در آزمون پمپاژ و منحنی شاخص معادله تایس، می‌توان با قرار دادن دو منحنی بر روی یکدیگر و استخراج مختصات نقطه تطابق، با استفاده از معادله تیس، مقادیر S و T را به‌دست آورد. مدل تحلیلی دیگری که درواقع حالت ساده شده‌ای از مدل تحلیلی تیس با شرط $u\leq 0.01$ است، به شکل معادله (۴) می‌باشد (Jacob, 1944).

$$s=\frac{2.3Q}{4\pi T}\log\frac{2.25Tt}{r^2 S} \qquad (۴)$$

که در این رابطه نیز، t زمان از شروع پمپاژ (ثانیه)، r فاصله چاه مشاهده‌ای از مرکز چاه پمپاژ (متر)، s افت سطح آب در چاه مشاهده‌ای (متر)، Q دبی پمپاژ (متر مکعب بر ثانیه)، S ضریب ذخیره و T ضریب قابلیت انتقال آبخوان می‌باشد.

مدل‌ها و روش‌های تحلیلی آزمون پمپاژ در آبخوان آزاد

نیومن[1] وقوع پدیده زهکشی تأخیری را وابسته به مؤلفه قائم جریان در آبخوان آزاد معرفی نمود و با فرض وقوع زهکشی آنی در آبخوان آزاد، پاسخ آبخوان به پمپاژ را تابعی از نسبت ناهمسویی هدایت هیدرولیکی عمودی به افقی (Kz/Kr)، فاصله چاه مشاهده‌ای از مرکز چاه پمپاژ (r) و ضخامت اشباع آبخوان (b) معرفی کرد (Neuman, 1972). از آنجایی که روش تحلیلی نیومن در قیاس با سایر مدل‌های تحلیلی ارائه شده، پرکاربردتر است، در نتیجه در این پژوهش مبنای ارزیابی قرار گرفته و از معادلات تحلیلی مدل مذکور استفاده شده است. نیومن معتقد بود که معادله (۲) باید به صورت زیر نوشته شود:

$$s=\frac{Q}{4\pi T}W(ua، uy ،\eta) \quad (۵)$$

$$u_a=\frac{r^2S}{4Tt} \quad (۶)$$

$$u_y=\frac{r^2S_y}{4Tt} \quad (۷)$$

$$\eta=\frac{r^2k_z}{b^2k_r} \quad (۸)$$

$$T=K_rb \quad (۹)$$

در این روابط، Kr برابر با ضریب هدایت هیدرولیکی افقی، Kz ضریب هدایت هیدرولیکی قائم، S ضریب ذخیره، Sy آبدهی ویژه، b ضخامت ناحیه اشباع سفره، r فاصله افقی چاهک مشاهده‌ای از مرکز چاه پمپاژ و t مدت زمان طی شده از شروع پمپاژ است. پارامتر ua متناظر با زمان‌های اولیه پمپاژ و پارامتر uy متناظر با زمان‌های بلندمدت پمپاژ است و مقادیر عددی تابع W(ua, uy, η) برحسب مقادیر مختلف ua، uy و η در قالب منحنی‌های نمونه نیومن ارائه شده است (شکل ۲).

از روش انطباق بر منحنی‌های شاخص یا نمونه به‌صورت دو مرحله‌ای، به‌منظور تخمین مشخصه‌های اصلی هیدرودینامیک آبخوان آزاد (K، T، S و Sy) (بر اساس معادلات ارائه شده توسط نیومن) استفاده شده است؛ بدین‌صورت که اطلاعات یا داده‌های زمان های ابتدایی آزمون پمپاژ بر قسمت اول منحنی‌های شاخص و داده‌های زمان‌های بلندمدت پمپاژ بر قسمت انتهایی منحنی‌های شاخص نیومن انطباق می‌یابند و سپس با انتخاب نقطه تطابق، مشخصه‌های هیدرودینامیک آبخوان شامل Kr، Kz، S و Sy تخمین زده می‌شوند.

تئوری تحلیل داده‌های ژئوالکتریک در آبخوان آزاد

ارزیابی پارامترهای هیدرودینامیک یک آبخوان با استفاده از روش‌های ژئوالکتریک، به‌دلیل سهولت اجرا و کم‌هزینه بودن، کمک شایانی به مطالعات هیدروژئولوژیکی می‌کند. پارامترهایی مانند عمق، جهت جریان آب زیرزمینی، ضخامت لایه آبدار و محدوده سفره آبدار را می‌توان مستقیماً از تفسیر نتایج ژئوالکتریکی به‌دست آورد. از طرف دیگر با توجه به تشابه خصوصیات جریان آب زیرزمینی و جریان الکتریکی در محیط متخلخل (تشابه قانون دارسی و اهم) و ارتباط بین پارامترهای ژئوالکتریکی و هیدروژئولوژی، می‌توان سایر پارامترهای هیدروژئولوژیکی (مثل Sy) را نیز تخمین زد. با داشتن مقاومت الکتریکی آب موجود در فضاهای خالی (ρw) و مقاومت الکتریکی کل در زون‌های اشباع (ρsat) و غیراشباع (ρunsat) آبخوان و با استفاده از معادله (۱۰)، می‌توان آبدهی ویژه سفره آبدار (Sy) را به‌دست آورد.

$$S_y=\left(\frac{\rho_w}{\rho_{sat}}\right)^{\frac{1}{m}}\left[1-\left(\frac{\rho_{sat}}{\rho_{unsat}}\right)^{\frac{1}{n}}\right] \quad (۱۰)$$

که در این روابط کلیه مقاومت‌ها برحسب اهم‌متر (Ωm) و پارامترهای m و n مربوط به درجه سیمانی شدن دانه‌های تشکیل دهنده سفره آبدار هستند، مقدار m برای هر نمونه متفاوت است و در بیشتر رسوبات آبرفتی سخت نشده متخلخل، از قانون اولیه آرچی پیروی می‌کند (Archie, 1942).

مقاومت الکتریکی آب موجود در فضاهای خالی (ρw) را می‌توان با اندازه‌گیری مقدار هدایت الکتریکی (EC) برحسب میکروموس بر سانتی‌متر (µmhos/cm) در چاه‌های آب مجاور نقاط سونداژهای ژئوالکتریک و با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه کرد.

$$\rho_w=\frac{10^4}{EC} \quad (۱۱)$$

میزان تخلخل لایه آبدار را می‌توان با ارزیابی فاکتور سازند (F) تخمین زد. برای اولین بار آرچی در سال ۱۹۴۲ فاکتور سازند را با استفاده از رابطه (۱۲) برای محیط‌های اشباع از آب شور و نسبتاً تمیز (مانند سنگ‌های کوارتزی و کربنات‌های فاقد رس) محاسبه کرد و سپس با استفاده از رابطه (۱۳) میزان تخلخل (Ø) را تخمین زد.

$$F=\frac{\rho_{sat}}{\rho_w} \quad (۱۲)$$

$$F=a\text{Ø}^{-m} \quad (۱۳)$$

در سفره‌های آبدار فاقد رس، فاکتور سازند تنها به تخلخل و پیچاپیچی خلل و فرج محیط بستگی دارد که حاکی از میزان تخلخل آن است (Nakhaei & Lashkaripour, 2004).

نتایج و بحث

داده‌های آزمایش پمپاژ و سونداژهای ژئوالکتریکی در محدوده مطالعاتی به‌وسیله نرم‌افزارهای aquifer test، IPI2win و روابط مربوط به هر دو روش تفسیر و تحلیل گردید و درنهایت ضرایب هیدرودینامیک هر دو روش استخراج و با همدیگر مقایسه شدند.

1- Neuman

تحلیل آزمون پمپاژ در آبخوان محدوده مطالعاتی و استخراج ضرایب هیدرودینامیک

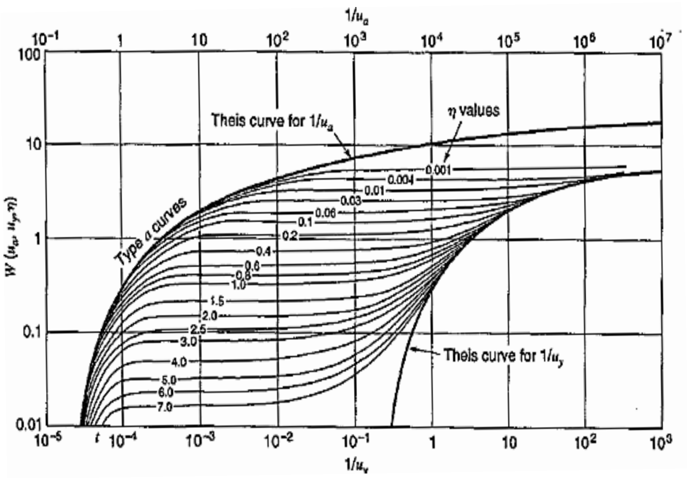
در محدوده مطالعاتی داده‌های آزمایش پمپاژ دو چاه اکتشافی موجود است (جدول ۱) که با استفاده از اطلاعات این دو چاه پمپاژ، تجزیه و تحلیل داده‌ها به‌وسیله روش کوپر-ژاکوب که مخصوص آبخوان‌های محبوس است انجام شده است و درنهایت به‌وسیله روش نیومن که مختص آبخوان‌های آزاد می‌باشد ضرایب هیدرودینامیک محاسبه شده است.

در روش کوپر ژاکوب داده‌های زمان -افت در محور نیمه لگاریتمی ترسیم و خطی که بر روی نقاط بهترین انطباق را داشته باشد تا جایی که محور افقی زمان را قطع کند ادامه می‌یابد، در این نقطه که مقدار افت صفر در نظر گرفته می شود می‌توان زمان شروع افت (t0) را به‌دست آورد و در ادامه با استفاده از رابطه ۴ و نرم‌افزار aquifer test مقادیر ضریب ذخیره (S) و ضریب قابلیت انتقال (T) را محاسبه کرد (شکل ۳).

در جدول ۲ مقادیر محاسباتی ضرایب هیدرودینامیک به روش ژاکوب آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد مقادیر هدایت هیدرولیکی برای چاه پمپاژ شماره یک و دو به‌ترتیب ۴/۹ و ۵/۷ و مقادیر ضریب ذخیره نیز به‌ترتیب برای چاه شماره یک و دو ۰/۰۱۵ و ۰/۰۲۱ می‌باشد. طبق روابط کوپر-ژاکوب هرگاه مقادیر ضریب ذخیره بیشتر از ۰/۰۰۱ باشد آبخوان از نوع آزاد است که در مطالعه حاضر مقادیر ضریب ذخیره برای هر دو چاه پمپاژ نشان‌دهنده این است که آبخوان از نوع آزاد می‌باشد.

از آنجایی‌که آبخوان آبرفتی محدوده مطالعاتی از نوع آزاد می‌باشد، نقش پدیده زهکشی تأخیری و مؤلفه قائم جریان نیز باید در نظر گرفته شود و بنابراین، بر اساس مدل تحلیلی نیومن و با کمک روابط ۵ تا ۹ به‌وسیله نرم‌افزار Aquifer test آبخوان مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۴).

از مقایسه دو روش کوپر-ژاکوب و نیومن برای آبخوان آزاد شمال شرق گچساران می‌توان به این نتیجه رسید که روش نیومن که مختص آبخوان‌های آزاد است بهتر و مؤثرتر است. پس از ترسیم نمودار لگاریتمی افت-زمان نیومن، از قسمت اول منحنی مقادیر آبدهی ویژه (Sy) برای چاه پمپاژ شماره یک و دو به‌ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۰۴ به‌دست آمده است که مربوط به آبدهی تأخیری می‌باشد. از قسمت دوم منحنی مقادیر ضریب ذخیره برای چاه پمپاژ شماره یک و دو به‌ترتیب ۰/۰۱۵ و ۰/۰۲۱ به‌دست می‌آید. در جدول ۳ مقادیر محاسباتی ضرایب هیدرودینامیک به روش نیومن در چاه‌های پمپاژ آبخوان آورده شده است.



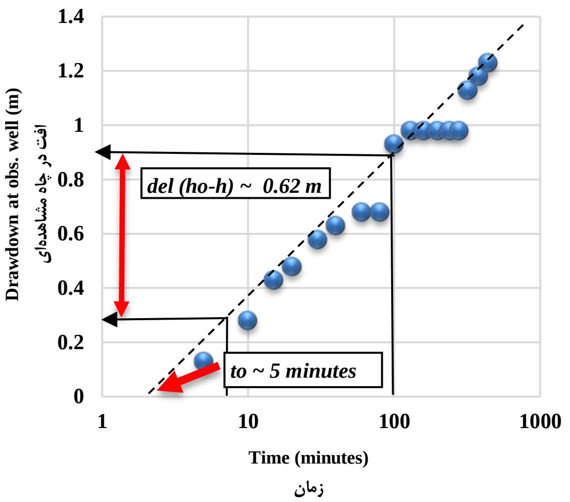
شکل ۲- منحنی نظری تابع چاه W (ua, uy,η) در برابر 1/ua و 1/uy برای آبخوان آزاد (Neuman, 1972)

Figure 2- Family of Neuman type curves: W(ua, uy, η) versus 1/ua and 1/uy for unconfiend aquifer

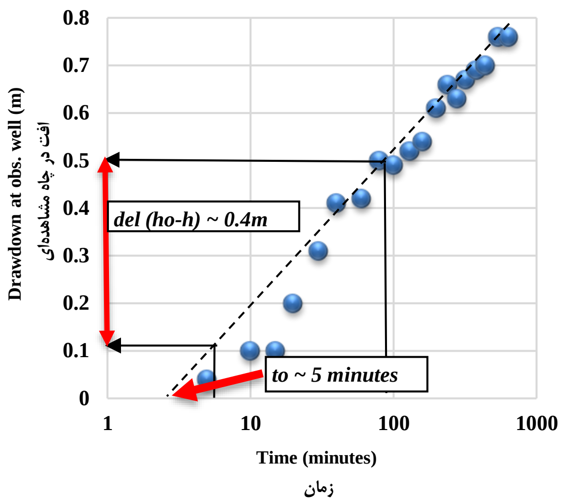
جدول ۱- داده‌های چاه‌های پمپاژ در آبخوان آبرفتی شمال شرق گچساران

Table 1- The data of pumping wells in the alluvial aquifer at the north-east of Gachsaran City

شماره چاه Well No.	طول جغرافیایی Longitude [X (UTM)]	عرض جغرافیایی Latitude [Y (UTM)]	عمق چاه Well depth (m)	ضخامت اشباع آبخوان Aquifer saturated thickness [b (m)]	دبی پمپاژ Discharge flow rate [Q (m³/d)]	فاصله چاه مشاهده‌ای از چاه پمپاژ Distance of the observation well from the pumping well [r (m)]	حداکثر افت Max of drawdown (m)
1	490198	3356156	200	66	2678.4	20	1.23
2	496428	3353645	200	115	2376	20	0.76



(ب)
(B)



(الف)
(A)

شکل ۳- موقعیت داده‌های افت- زمان بر روی نمودار نیمه لگاریتمی ژاکوب و به‌دست آوردن t0 و s برای چاه پمپاژ ۱(الف) و چاه پمپاژ ۲ (ب)

Figure 3- The location of pumping test data on the Jacob time-drawdown semi-log plot and the determination of t0 and s for pumping well 1 (a) and pumping well 2 (b)

جدول ۲- مقادیر محاسباتی ضرایب هیدرودینامیک به روش ژاکوب در چاه‌های پمپاژ آبخوان آبرفتی شمال شرق گچساران

Table 2- Computational values of hydrodynamic coefficients by Jacob's method in pumping wells of alluvial aquifer at the north-east of Gachsaran city

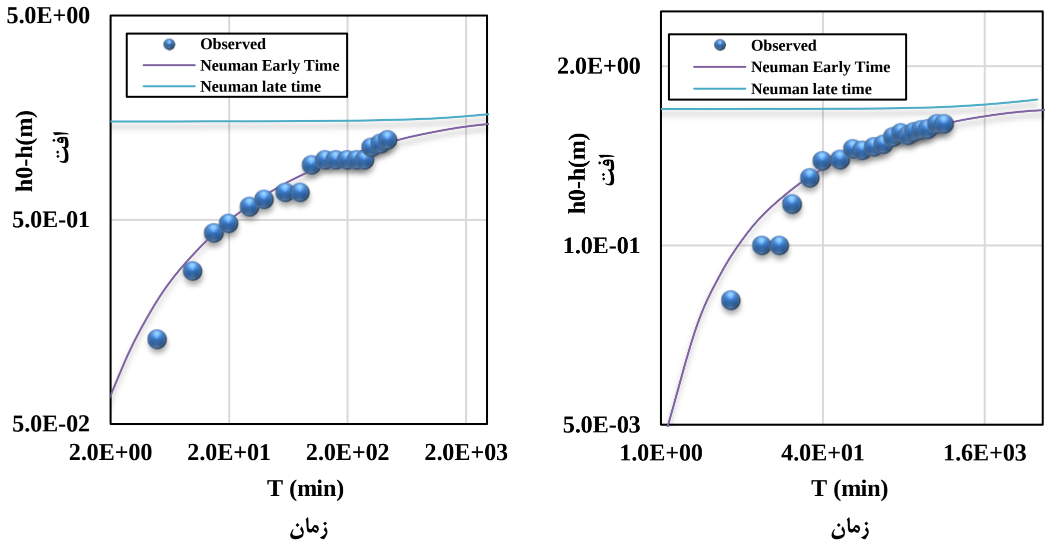
شماره چاه Well No.	طول جغرافیایی Longitude [X (UTM)]	عرض جغرافیایی Latitude [Y (UTM)]	دبی پمپاژ Discharge flow rate [Q (m^3/d)]	زمان شروع افت Time intercept for zero drawdown [t_0(min)]	فاصله چاه مشاهده‌ای از چاه پمپاژ Distance of the observation well from the pumping well [r (m)]	قابلیت انتقال Transmissivity T(m^2/day)	هدایت هیدرولیکی Hydraulic conductivity K(m/day)	ضریب ذخیره Storage Coefficient S
1	490198	3356156	1.86	5	20	323	4.9	0.015
2	496428	3353645	1.65	5	20	655.5	5.7	0.021

تحلیل داده‌های ژئوالکتریک آبخوان و استخراج ضرایب هیدرودینامیکی

از نرم‌افزار IPI2win (Bobachev, 2002) و روش یکسان‌سازی منحنی جزئی معمولی برای تحلیل و تفسیر اولیه اطلاعات سونداژ الکتریکی قائم (VES) استفاده شد؛ به‌طوری‌که مقاومت و ضخامت تخمینی لایه بدست آمد. بنابراین، کمی کردن نتایج سونداژ عمقی ژئوالکتریکی با استفاده از مقاومت لایه مربوطه و ویژگی های آب منفذی امکان‌پذیر بود.

کمیت تخلخل (ø) در مطالعات هیدروژئولوژی اهمیت بسیاری دارد و میزان آن در مواد ر سوبی به شکل، اندازه و ضعیت قرارگیری ذرات نسبت به هم، درجه سیمانی شدن و تراکم رسوبات بستگی دارد. از آنجایی که نهشته‌های رسوبی در آبخوان آبرفتی محدوده مورد مطالعه، از نوع رسوبات سخت نشده با جورشدگی نسبتاً ضعیف هستند؛ در نتیجه، در تحقیق حاضر مقادیر m و n به‌ترتیب برابر ۱/۵ و ۲ فرض شده است (Rostami & Hassani-Giv, 2011). با در دست داشتن مقادیر m و n و استفاده از روابط ۱۲ و ۱۳، می‌توان فاکتور سازند (F) و مقادیر تخلخل را محاسبه و برای نقاط مختلف آبخوان درون‌یابی کرد (جدول ۴). کمینه و بیشینه مقدار تخلخل در آبخوان مورد مطالعه به‌ترتیب حدود ۰/۱۵ در ناحیه شرقی و جنوب شرقی آن (محل خروجی دشت) و حدود ۰/۴۱ در بخش میانی، شمالی و

شمال‌غرب منطقه (در مجاورت با سازند آسماری) می‌باشد. مقدار متو سط تخلخل در این آبخوان، به‌طور تقریبی ۲۶ در صد تخمین زده می‌شود (شکل ۵).



(ب) (B) (الف) (A)

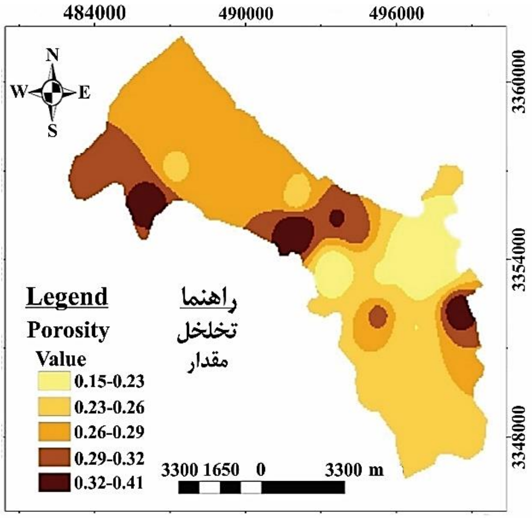
شکل ٤- موقعیت نقاط زمان-افت در نمودار لگاریتمی نیومن، برای چاه‌های پمپاژ ۱ (الف) و ۲ (ب)

Figure 4- the location of pumping test data on the Neuman time-drawdown log-log plot for pumping well 1 (a) and pumping well 2 (b)

جدول ۳- مقادیر محاسباتی ضرایب هیدرودینامیک به روش نیومن در چاه‌های پمپاژ آبخوان آبرفتی شمال شرق گچساران

Table 3- Computational values of hydrodynamic coefficients by Neuman's method in pumping wells of the northeastern Gachsaran City alluvial aquifer

شماره چاه Well No.	طول جغرافیایی Longitude [X (UTM)]	عرض جغرافیایی Latitude [Y (UTM)]	دبی پمپاژ Discharge flow rate [Q (m^3/d)]	η	r (m)	b (m)	T (m^2/day)	K (m/day)	S	Sy
1	490198	3356156	1.86	5	20	66	323	4.9	0.015	0.05
2	496428	3353645	1.65	5	20	115	655.5	5.7	0.021	0.04



شکل ۵- نقشه میزان تخلخل آبخوان شمال شرق شهر گچساران

Figure 5- Porosity map of the northeastern Gachsaran City alluvial aquifer

برای تخمین مقادیر آبدهی ویژه (sy)، داده های ژئوالکتریک حاصل از ۸۶ سونداژ قائم ژئوالکتریکی (آرایه شلومبرژه بر اساس ۴ فاصله الکترودهای جریان ۱۰۰، ۲۰۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ متری) با استفاده از نرم‌افزار IPI2win تحلیل و سپس با توجه به عمق سطح ایستابی سفره آبدار، مقاومت در دو زون اشباع (ρsat) و غیراشباع (ρunsat) آبخوان به‌دست آمد. در ادامه مقادیر مقاومت الکتریکی کل در زون های اشباع و غیرا شباع آبخوان برای محل چاه‌هایی که مقدار هدایت الکتریکی آب آن‌ها در دسترس است استخراج و با استفاده از رابطه (۱۰)، آبدهی ویژه به‌دست آمد (جدول ۴). حداقل و حداکثر آبدهی ویژه به‌ترتیب ۰/۰۰۶ (در نواحی شرق و جنوب‌شرقی) و ۰/۰۸۹ (در نواحی غرب و شمال‌غربی دشت) و متوسط آن حدود ۰/۰۴ تخمین زده شد (شکل ۶).

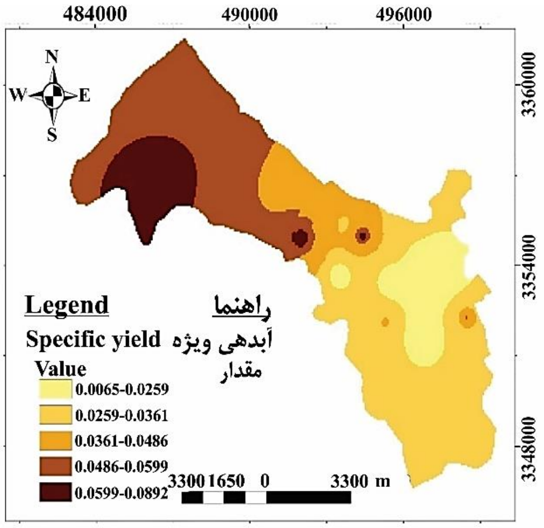
برای به‌دست آوردن ضریب قابلیت انتقال در محل چاه‌ها نمودار هدایت هیدرولیکی به‌دست آمده از دو روش اجرای مدل و آزمون پمپاژ اصلاحی در مقابل فاکتور سازند که از معادله ۱۹ استخراج شده ترسیم گردید (Ahmadi, 2008). رابطه تجربی بین هدایت هیدرولیکی (K) و فاکتور سازند (F) با استفاده از روش رگرسیون چندجمله‌ای با ضریب همبستگی برابر ۰/۸۵ به‌دست آمد (شکل ۷).

$$Y=-0.1x^2+2.05x-4.5 \quad (۱۴)$$

به‌منظور تخمین مقدار ضریب قابلیت انتقال، از هدایت هیدرولیکی (K) به‌دست آمده از معادله ۱۴ در موقعیت چاه‌ها (شکل ۸)، ضخامت آبخوان (b) به‌دست آمده از مطالعات ژئوالکتریک و همچنین عمق چاه‌های اکتشافی که تا سنگ کف آبخوان حفاری شده‌اند استفاده می شود (شکل ۹). بنابراین بر اساس معادله ۱۵ مقدار ضریب قابلیت انتقال در موقعیت چاه‌ها به‌دست می‌آید و برای کل آبخوان درون‌یابی می‌گردد (شکل ۱۰).

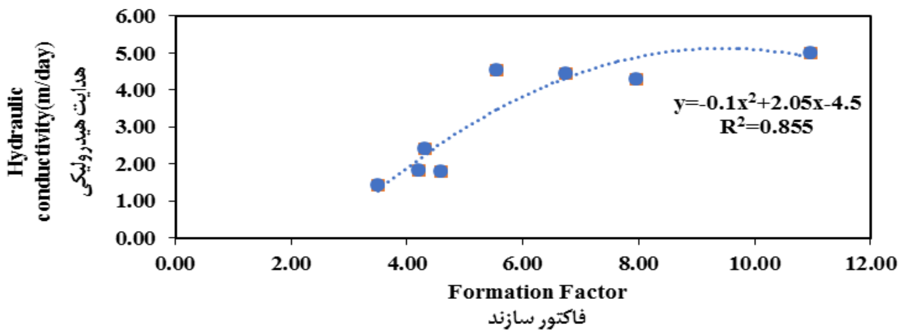
$$T=Kb=(K=-0.1x^2+2.05x-4.5)\times b \quad (۱۵)$$

در معادله بالا، K هدایت هیدرولیکی افقی، T ضریب قابلیت انتقال آبخوان و b ضخامت اشباع آبخوان می‌باشد.



شکل ٦- نقشه آبدهی ویژه آبخوان شمال شرق شهر گچساران

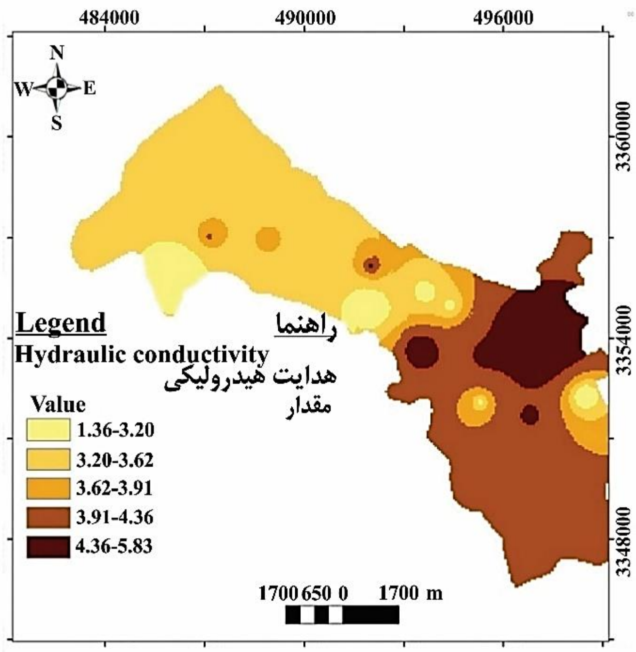
Figure 6- Specific yield map of the northeastern Gachsaran City alluvial aquifer



شکل ۷- نمودار هدایت هیدرولیکی در مقابل فاکتور سازند

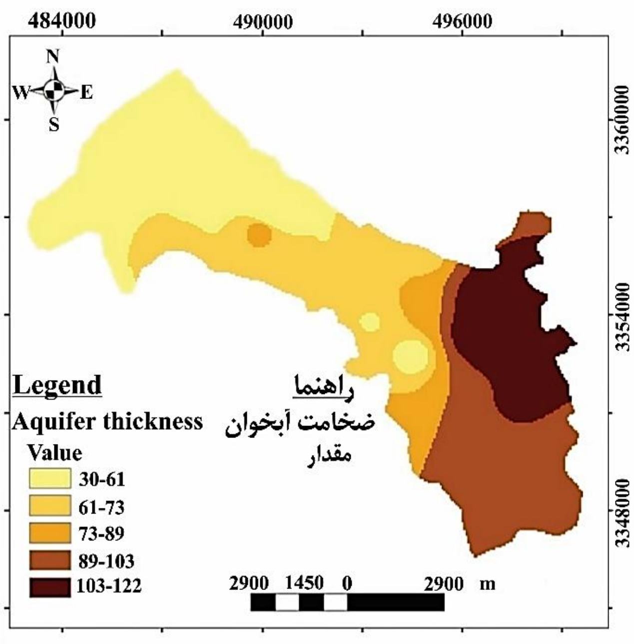
Figure 7- Plot of hydraulic conductivity versus formation factor

همان‌طور که در شـــکل ۱۰ مشـــاهده می‌گردد حداقل و حداکثر ضـــریب قابلیت انتقال به‌ترتیب ۶۳ متر مربع بر روز (در نواحی غرب و شـــمال‌غربی دشـــت) و ۶۰۸/۹ متر مربع بر روز (در نواحی شـــرق و جنوب شرقی) و متو سط آن حدود ۳۲۳/۷ متر مربع بر روز تخمین زده شده است. لازم به ذکر است که نقشه‌های هم قابلیت انتقال دشت به طور معمول ثابت نیستند و با گذ شت زمان و تغییر تراز سطح ایستابی (تغییر ضـخامت آبخوان) تغییر می‌نمایند؛ بنابراین، در صـورت تغییرات فاحش سطح ایستابی باید به روزرسانی گردند.



شکل ۸- نقشه هدایت هیدرولیکی (K، متر بر روز) آبخوان شمال شرق شهر گچساران

Figure 8- Hydraulic conductivity (m/day) map of the alluvial aquifer at the north-east of Gachsaran City

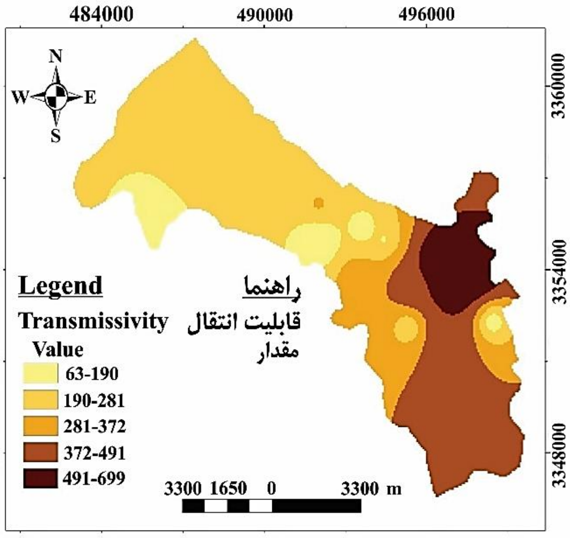


شکل ۹- نقشه ضخامت اشباع ((متر)b) آبخوان شمال شرق شهر گچساران

Figure 9- Saturated thickness (b(m)) map of the alluvial aquifer at the north-east of Gachsaran City

مقایسه نتایج به دست آمده از طریق روش ژئوالکتریک و آزمون پمپاژ

در جدول ۵ ضرایب هیدرودینامیک به‌دست آمده از هر دو روش آزمایش پمپاژ و روش ژئوالکتریک با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد مقادیر عددی آبدهی ویژه (Sy)، ضریب قابلیت آبخوان (T) و هدایت هیدرولیکی (K) که از روش آزمایش پمپاژ استخراج گردیده است به مقادیر عددی روش ژئوالکتریک بسیار نزدیک می‌باشد و نتایج نشان می‌دهد که روش ژئوالکتریک قادر به تخمین قابل قبولی از پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان (ضرایب هیدرودینامیک) می‌باشد.



شکل ۱۰- نقشه ضریب قابلیت انتقال (بر حسب متر مربع بر روز) آبخوان شمال شرق شهر گچساران

Figure 10- Transmissivity coefficient (m^2/day) map of the alluvial aquifer at the north-east of Gachsaran City

جدول ٤- آبدهی ویژه، فاکتور سازند، تخلخل، هدایت هیدرولیکی و ضریب قابلیت انتقال دشت به روش ژئوالکتریک

Table 4- the values of specific yield, formation factor, porosity, hydraulic conductivity, and transmissivity in the aquifer obtained by the geoelectric method

شماره چاه Well No.	طول جغرافیایی Longitude [X (UTM)]	عرض جغرافیایی Latitude [Y (UTM)]	هدایت الکتریکی Electrical conductivity Ec_w (µmhos/cm)	ρ_{sat}	ρ_{unsat}	ρ_w	F	Sy	Φ	K (m/day)	T (m^2/day)
W1	487140	3357030	857	68.9	140.4	11.67	5.9	0.076	0.05	1.8	115.75
W2	486290	3356030	1130	33.9	61.3	8.85	3.8	0.091	0.02	4.11	265.35
W3	488910	3356910	420	132.1	200	23.81	5.54	0.05	0.02	3.8	228.44
W4	491200	3356500	428	121.9	160.9	23.36	5.21	0.036	0.03	3.5	211.11
W5	492000	3356160	572	116.3	180.4	17.48	6.65	0.045	0.01	4.7	289.62
W6	493650	3355370	406	100	118.7	24.63	4.06	0.027	0.04	1	62.63
W7	493501	3353713	1220	90	93	8.2	10.98	0.002	0.03	5.6	358.28
W8	494400	3354980	438	100	180	22.83	4.38	0.081	0.03	2.2	144.98
W9	498460	3352280	795	43.9	59.6	12.58	3.49	0.054	0.06	2.5	188.52
W10	496550	3354320	631	150	194.6	15.85	9.46	0.021	0.04	2.8	222.5
W11	495472	3353505	906	77.7	83.6	11.04	7.03	0.008	0.04	4.9	470.32
W12	496801	3351690	1606	42	44	6.23	6.74	0.005	0.02	5.9	699.07
W13	497010	3353350	837	95	100	11.95	7.95	0.005	0.01	4.7	490.06
W14	497810	3353870	1120	100.3	110.4	8.93	11.23	0.007	0.04	5.4	620.6
W15	492006	3354906	508	61.9	100	19.69	3.14	0.088	0.02	5.9	661.25
W16	495300	3352100	1047	43.9	59.6	9.55	4.59	0.043	0.02	1.4	152.21

جدول ٥- مقایسه نتایج به دست آمده از طریق روش آزمون پمپاژ و ژئوالکتریک

Table 5- A Comparison between the results obtained through pumping test and geoelectric methods

شماره چاه	K(m/d)		T(m^2/d)		Sy	
Well No.	**PT***	**VES***	**PT**	**VES**	**PT**	**VES**
1	4.9	3.6	323	237	0.05	0.05
2	5.7	5.5	655.5	632.5	0.04	0.03

*PT: Pumping Test, VES: Vertical Electrical Sounding

نتیجه‌گیری

یکی از قابل اعتمادترین روش ها برای اندازه‌گیری ضرایب هیدرودینامیک آبخوان، آزمایش پمپاژ است. مزیت این روش دقت بالای آن و عیب این روش هزینه بالای آن است؛ بااین‌حال روش‌های ژئوفیزیکی تکنیکی مؤثر برای ارزیابی و کاهش تعداد آزمایش های پمپاژ می‌باشد. ژئوفیزیک توانسته است با صرفه‌جویی در هزینه‌ها و زمان و قابلیت استفاده در لیتولوژی‌های متنوع کمک قابل توجه‌ای در تخمین پارامترهای هیدرودینامیکی آبخوان داشته باشد. در این تحقیق ابتدا ضرایب هیدرودینامیک سفره آبدار با دو روش تحلیلی آزمایش پمپاژ، عبارتند از کوپر- ژاکوب و نیومن، محاسبه شد و پس از ارزیابی و مقایسه نتایج، روش نیومن، به‌دلیل اینکه مختص آبخوان‌های آزاد است و علاوه بر ضریب ذخیره، مقادیر آبدهی ویژه (Sy) را نیز به ما می‌دهد بهتر و مناسب‌تر تشخیص داده شد. مقادیر آبدهی ویژه (Sy) به روش نیومن برای چاه پمپاژ شماره یک و دو به‌ترتیب ۰/۰۵ و ۰/۰۳ و مقادیر ضریب ذخیره نیز برای چاه پمپاژ شماره یک و دو به‌ترتیب ۰/۰۱۵ و ۰/۰۲۱ به‌دست می‌آید. در گام بعد، پس از تحلیل داده‌های ژئوالکتر یک آبخوان با نرم‌افزار IPI2win و استخراج ضرایب هیدرودینامیک سفره آبدار با روابط آرچی، حداقل و حداکثر آبدهی ویژه (Sy) به‌ترتیب ۰/۰۰۶ (در نواحی شرق و جنوب شرقی) و ۰/۰۸۹ (در نواحی غرب و شمال غربی دشت) و متوسط آن حدود ۰/۰۴ تخمین زده شد. حداقل و حداکثر ضریب قابلیت انتقال نیز به‌ترتیب ۶۳ (در نواحی غرب و شمال غربی دشت) و ۶۰۸/۹ (در نواحی شرق و جنوب شرقی) و متوسط آن حدود ۳۲۳/۷ متر مربع بر روز به‌دست آمد. ارزیابی و مقایسه نتایج هر دو روش حاکی از این است که ضرایب حاصل از روش ژئوالکتریک توسط آزمون پمپاژ تایید می‌شود. به‌عبارت دیگر، از نتایج به‌دست آمده از آزمون پمپاژ چاه‌های شماره یک و دو به روش نیومن در آبخوان آزاد معلوم گردید که ضریب قابلیت انتقال برای چاه شماره دو که در قسمت شرقی آبخوان قرار دارد مقدار بیشتری است که با نتایج روش ژئوالکتریک همخوانی دارد و همچنین مقدار آبدهی ویژه در روش آزمون پمپاژ چاه شماره یک مقدار بیشتری است که باز هم روش ژئوالکتریک آن را تأیید می‌کند.

چنین رویکرد های ترکیبی شامل تجزیه و تحلیل همزمان روش های ژئوفیزیکی (مانند VES) و آزمایش پمپاژ جایگزین عالی برای آزمایش های متعدد و پرهزینه پمپاژ برای ارزیابی ضرایب هیدرودینامیکی یک آبخوان خواهد بود. علاوه بر این، به کارگیری این تکنیک ترکیبی امکان تولید ضرایب هیدرودینامیکی متراکم را در یک آبخوان برای استفاده به‌عنوان ورودی در مدل‌های آب زیرزمینی فراهم می‌کند.

در نهایت باید اشاره گردد که اگرچه رویکردهای ژئوفیزیکی به عنوان روش‌هایی غیرمخرب (عدم نیاز به حفاری)، سریع، سازگار با محیط‌زیست، و با هزینه‌های کمتر از آزمایش پمپاژ برای بدست آوردن حجم زیادی از اطلاعات زیرسطحی، در چند دهه اخیر مورد اقبال هیدروژئولوژیست‌ها برای تخمین پارامترهای هیدرولیکی آبخوان قرار گرفته‌اند، با این حال نتایج بدست آمده از آنها نیز دارای عدم قطعیت هایی می باشند. از مهمترین منابع عدم‌قطعیت می‌توان به خطای روش‌های حل وارون در مدل‌های ژئوفیزیکی، سطح صحت داده‌های میدانی، عدم قطعیت‌های زمین‌شناسی به‌دلیل برداشت غیرمستقیم اطلاعات که در برخی مناطق نیاز به حفر گمانه وجود دارد، مفروضات مورد استفاده در روابط پتروفیزیکی که متغیر های اندازه‌گیری شده را به پارامترهای ژئوالکتروهیدرولیکی مرتبط می‌کنند (نظیر برآورد فاکتور سازند) اشاره نمود. لازم به ذکر است که بهبود در روش های استخراج اطلاعات از داده‌های ژئوفیزیکی، استفاده از روش‌های مکمل (نظیر IP و ...) و توسعه الگوریتم‌های حل وارون، اگرچه منجر به کاهش شدید عدم قطعیت‌های معمول مرتبط با تبدیل عادی اطلاعات ژئوفیزیک به خواص هیدرولوژیکی و سایر استنتاج‌های مرتبط شده است، اما عدم‌قطعیت‌های مرتبط با فاکتور سازند (استخراج شده برای محیط‌های کاملاً اشباع و فاقد رس) همچنان به قوت خود باقی است.

References

1. Abdulrazzaq, Z.T., Al-Ansari, N., Ahmed Aziz, N., Agbasi, O.E., & Etuk, S.E. (2020). Estimation of main aquifer parameters using geoelectric measurements to select the suitable wells locations in Bahr Al-Najaf depression, Iraq. *Groundwater for Sustainable Development*, *11*, 100437. https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100437
2. Ahmadi, S. (2008). *Investigating and forecasting the fluctuations of the Imamzadeh Jafar plain aquifer in Gachsaran city with a perspective on the effects of artificial recharge and using the MODFLOW model*. Master Thesis in Hydrogeology, Science Faculty, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran. Iran. (In Persian with English abstract)
3. Archie, GE. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Transactions of the AIME*, *146*(01), 54-62. https://doi.org/10.2118/942054-G
4. Arétouyap, Z., Bisso D., Méli'I, J.L., Nouck, F.N., Njoya, A., & Asfahani, J. (2019). Hydraulic parameters evaluation of the Pan-African aquifer by applying an alternative geoelectrical approach based on vertical electrical soundings. *Geofísica Internacional*, *58*(2), 113-126. https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2018.58.2.1964
5. Bobachev, C. (2002). *IPI2Win: A windows software for an automatic interpretation of resistivity sounding data*. PhD Thesis, Moscow State University, Russia.
6. Calvache, M.L., Sánchez-Úbeda, J.P., Duque, C., López-Chicano, M., & de la Torre, B. (2016). Evaluation of analytical methods to study aquifer properties with pumping tests in coastal aquifers with numerical modelling (Motril-Salobreña Aquifer). *Water Resources Management, 30*, 559–575. https://doi.org/10.1007/s11269-015-1177-6
7. Chen, J., Hubbard, S., & Rubin, Y. (2001). Estimating the hydraulic conductivity at the South Oyster Site from geophysical tomographic data using Bayesian techniques based on the normal linear regression model. *Water Resources Research*, *37*(6), 1603-1613. https://doi.org/10.1029/2000WR900392
8. Crestani, E., Camporese, M., & Salandin, P. (2015). Assessment of hydraulic conductivity distributions through assimilation of travel time data from ERT-monitored tracer tests, *Advances in Water Resources*, *84*, 23-36. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.07.022
9. Darvishzadeh, A. (2003). *Geology of Iran*. 5th Edition, 902P, Amirkabir Publication, Tehran. (In Persian)
10. de Almeida, A., Maciel, D.F., Sousa, K.F., Nascimento, C.T.C., & Koide, S. (2021). Vertical electrical sounding (VES) for estimation of hydraulic parameters in the Porous aquifer. *Water*, *13*(2), 170(1-15). https://doi.org/10.3390/w13020170
11. Falowo, O.O., Daramola, A.S., & Ojo, O.O. (2019). Aquifers hydraulic parameters measurement and analysis by pumping test. *American Journal of Water Resources*, *7*(4), 146-154. https://doi.org/10.12691/ajwr-7-4-3
12. Frohlich, R.K., & Kelly, W.E. (1988). Estimates of specific yield with the geoelectric resistivity method in glacial aquifers. *Journal of Hydrology*, *97*(1-2), 33-44. https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90064-9
13. George, N.J., Ibuot, J.C., & Obiora, D.N. (2015). Geoelectrohydraulic parameters of shallow sandy aquifer in Itu, Akwa Ibom State (Nigeria) using geoelectric and hydrogeological measurements. *Journal of African Earth Sciences*, *110*, 52-63. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2015.06.006
14. Hasan, M., Shang, Y., Jin, W., & Akhter, G. (2019). Assessment of aquifer vulnerability using integrated geophysical approach in weathered terrains of South China. *Open Geosciences*, *11*, 1129–1150. https://doi.org/ 10.1515/geo-2019-0087
15. Hasan, M., Shang, Y., Jin, W., & Akhter, G. (2021). Estimation of hydraulic parameters in a hard rock aquifer using integrated surface geoelectrical method and pumping test data in southeast Guangdong, China. *Geosciences Journal*, *25*, 223–242. https://doi.org/10.1007/s12303-020-0018-7
16. Hatami Golmakani, P., Sheikh, V.B., & Hosseinalizadeh M. (2017). The effect of measurement methods on saturated hydraulic conductivity in eastern loess lands of Golestan province. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, *6*(4), 87-102. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22069/ejsms. 2017.10322.1614
17. Huntley, D. (1986). Relations between permeability and electrical resistivity in granular aquifers. *Groundwater*, *24*(4), 466-474. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1986.tb01025.x
18. Ige, O., Obasaju, D., Baiyegunhi, C., Ogunsanwo, O., & Baiyegunhi, T. (2018). Evaluation of aquifer hydraulic characteristics using geoelectrical sounding, pumping and laboratory tests: A case study of Lokoja and Patti Formations, Southern Bida Basin, Nigeria. *Open Geosciences*, *10*(1), 807-820. https://doi.org/10.1515/geo-2018-0063
19. Jacob, CE. (1944). *Notes on determining permeability by pumping tests under water-table conditions*. US Geological Survey open-file report. 1945, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA. Partial penetration of pumping well, adjustments for: US Geol. Survey open-file report. 1947, Drawdown test to determine effective radius of artesian well: Am. Soc. Civil Eng. Trans. 1944;112:1047-70.

20. Kazakis, N., & Vargemezis, G. (2016). Voudouris K.S., Estimation of hydraulic parameters in a complex porous aquifer system using geoelectrical methods. *Science of The Total Environment*, *550*, 742-750. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.133
21. Lashkaripour, Gh., Yazdanpanah, F., & Ansari, Kh. (2013). *Investigating the relationship between permeability coefficient (k) and gradation and proposing the empirical formula*. In 8th Conference of the Iranian Association of Engineering Geology and the Environment, 6 November 2013, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (In Persian)
22. Lekone, O.S., Tafesse, N.T., Ranganai, R.T., Laletsang, K., & Masaka, T.L. (2023). Estimation of Aquifer Hydraulic Parameters Using Geo-electric Method in the Dukwi Wellfields, North-eastern Botswana, PREPRINT (Version 1) available at *Research Square*, *1-27*. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3052755/v1
23. Minutti, C., Illman W.A., & Gomez S. (2020). A New Inverse Modeling Approach for Hydraulic Conductivity Estimation Based on Gaussian Mixtures. *Water Resources Research*, *56*(9), 1-21. https://doi.org/10.1029/2019WR026531
24. Nakhaei, M., & Lashkaripour, Gh. (2004). Estimation of Porosity and Specific yield of Shooru Aquifer by Resistivity method. *Journal of Science* (Tarbiat Moalem University), *3*(1), 191-202. (In Persian)
25. Neuman, S.P. (1972). Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed response of the water table. *Water Resources Research*, *8*(4), 1031-1045. https://doi.org/10.1029/WR008i004p01031
26. Perdomo, S., Ainchil, J.E., & Kruse, E. (2014). Hydraulic parameters estimation from well logging resistivity and geoelectrical measurements. *Journal of Applied Geophysics*, *105*, 50-58. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.02.020
27. Rostami, A., Hassani-Giv, M. (2011). Investigating the relationship between cementation and porosity as determined by core analysis and comparing it to Shell and Borai's experimental relationships in one of the dolomite reservoirs in southwest Iran. *Scientific Journal of Oil and Gas Exploration and Production*, *82*, 61-65. (In Persian)
28. Schimschal, U. (1981). The relationship of geophysical measurements to hydraulic conductivity at the brantley damsite, New Mexico. *Geoexploration*, *19*(2), 115-125. https://doi.org/10.1016/0016-7142(81)90024-7
29. Song, X.M., Kong, F.Z., & Zhan, S. (2011). Assessment of water resources carrying capacity in Tianjin city of China. *Water Resources Management*, *25*, 857–873. https://doi.org/10.1007/s11269-010-9730-9
30. Taheri-tizro, A.T., Voudouris, K., & Basami, Y. (2012). Estimation of porosity and specific yield by application of geoelectrical method–a case study in western Iran. *Journal of Hydrology*, *454*, 160-172. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.009
31. Theis, C.V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, *16*(2), 519-524. https://doi.org/10.1029/TR016i002p00519
32. Ullah, F., Su, L.J., Ullah, H., & Asghar, A. (2020). Estimation of hydraulic parameters of an unconfined aquifer by using geoelectrical and pumping test data: a case study of the Mandi Bahauddin District, Pakistan. *Arabian Journal of Geosciences*, *13*, 484. https://doi.org/10.1007/s12517-020-05488-3
33. Urish, D.W. (1981). Electrical resistivity-hydraulic conductivity relationships in glacial outwash aquifers. *Water Resources Research*, *17*(5), 1401-1408. https://doi.org/10.1029/WR017i005p01401
34. Vogeler, I., Carrick, S., Cichota, R., & Lilburne, L. (2019). Estimation of soil subsurface hydraulic conductivity based on inverse modelling and soil morphology. *Journal of Hydrology*, *574*, 373-382. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.002
35. Vu, M.T., & Jardani, A. (2022). Mapping of hydraulic transmissivity field from inversion of tracer test data using convolutional neural networks. CNN-2T, *Journal of Hydrology*, *606*, 127443, https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127443
36. Yeh, Y.J., Lee, C.H., & Chen, S.T. (2000). A tracer method to determine hydraulic conductivity and effective porosity of saturated clays under low gradients. *Groundwater*, *38*, 522-529. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2000.tb00244.x
37. Youssef, M.A.S. (2020). Geoelectrical analysis for evaluating the aquifer hydraulic characteristics in Ain El-Soukhna area, West Gulf of Suez, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, *9*(1), 85-98. https://doi.org/10.1080/20909977.2020.1713583